VISIT…

LANZAROTE

Caliente.com

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММЫ ELCUT В РАСЧЁТАХ ПО ДЕФЕКТОСКОПИИ

Ю.Я. Реутов, Ю.Л. Гобов, В.Е. Лоскутов

Приведены примеры расчетов типичных задач дефектоскопии, выполненные с использованием программы моделирования физических полей Elcut 4.1. Предложена методика, позволяющая существенно повысить точность и повторяемость расчётов с использованием этой программы. Выполнено сравнение результатов расчётов на версиях 4.1 и 4.2 программы Elcut. Показано, что расчёты на версии 4.1 программы, свободно распространяемой через сеть Интернет, позволяют выявлять основные закономерности решаемых задач. В тех случаях, когда абсолютная точность расчётов не имеет решающего значения, бесплатная версия программы Elcut может послужить хорошим подспорьем в работе специалиста по дефектоскопии.

Цель данной статьи – привлечь внимание специалистов по магнитной и электромагнитной дефектоскопии к компьютерной программе моделирования физических полей ELCUT 4.1, бесплатно распространяемой через сеть Интернет кооперативом ТОР (электронный адрес – http://www.tor.ru/elcut). Эта программа, объёмом всего около двух мегабайт, обладая чрезвычайно дружественным интерфейсом, позволяет моделировать и рассчитывать плоские и осесимметричные задачи магнитостатических полей и полей вихревых токов. Точность расчётов по данной программе ограничивается числом узлов координатной сетки (200 узлов), на которые разбивается область рассмотрения физической модели. Этот недостаток частично компенсируется высокой скоростью расчётов – самый сложный расчет продолжается не более одной-двух минут. В варианте расчёта магнитостатических полей программа ELCUT 4.1 позволяет учитывать нелинейность кривой перемагничивания и анизотропию магнитных свойств материала.

Здесь авторы делятся своим опытом применения указанной программы в прикидочных расчётах по дефектоскопии.

Задача магнитостатики

Пусть мы имеем магнитную цепь, изображённую на рис. 1 (задача является двумерной). Здесь 1 плоская стальная плита толщиной 20 мм и шириной 200 мм. Над ней на высоте 6 мм, симметрично относительно её середины, размещены два прямоугольных постоянных магнита 2 и 3 , намагниченные вертикально (вектор намагниченности одного направлен вверх, а другого вниз).

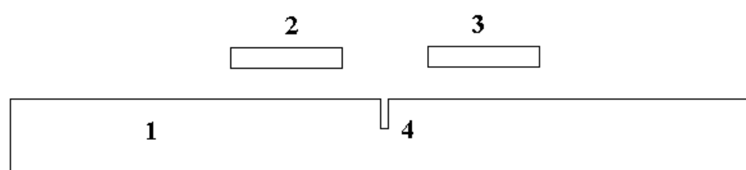


Рис. 1. Схема магнитной цепи при расчёте задачи магнитостатики.
Здесь: 1 - стальная плита, 2 и 3 - постоянные магниты, 4 - вертикальная щель.

Магниты изготовлены из сплава “АЛЬНИКО” и имеют ширину в плоскости рисунка 40 мм и высоту 5 мм. Магниты отстоят друг от друга на 20 миллиметров. Будем задавать в середине верхней части плиты вертикальную щель 4 шириной 1 мм и вычислять магнитный поток через нижнюю плоскость одного из магнитов при вариациях глубины щели[1]. Рассматриваем линейный случай. Зададимся магнитной проницаемостью плиты μ=100, что достаточно типично для случая дефектоскопии.

Из общих физических соображений можно ожидать, что магнитный поток будет максимален при глубине щели, равной нулю и будет монотонно уменьшаться по мере нарастания её глубины.

На рис. 2 (кривая 1) изображён результат расчёта данной задачи. Кривая 1 явно не соответствует нашим ожиданиям – с появлением щели поток сначала возрастает и лишь с достижением щелью глубины 6 миллиметров начинает монотонно уменьшаться. Более того, в конечном итоге, поток через плиту со сквозной щелью получается больше потока через плиту без щели.

[1] Практическая целесообразность такого построения “дефектоскопа” нас, в данном случае, не интересует.

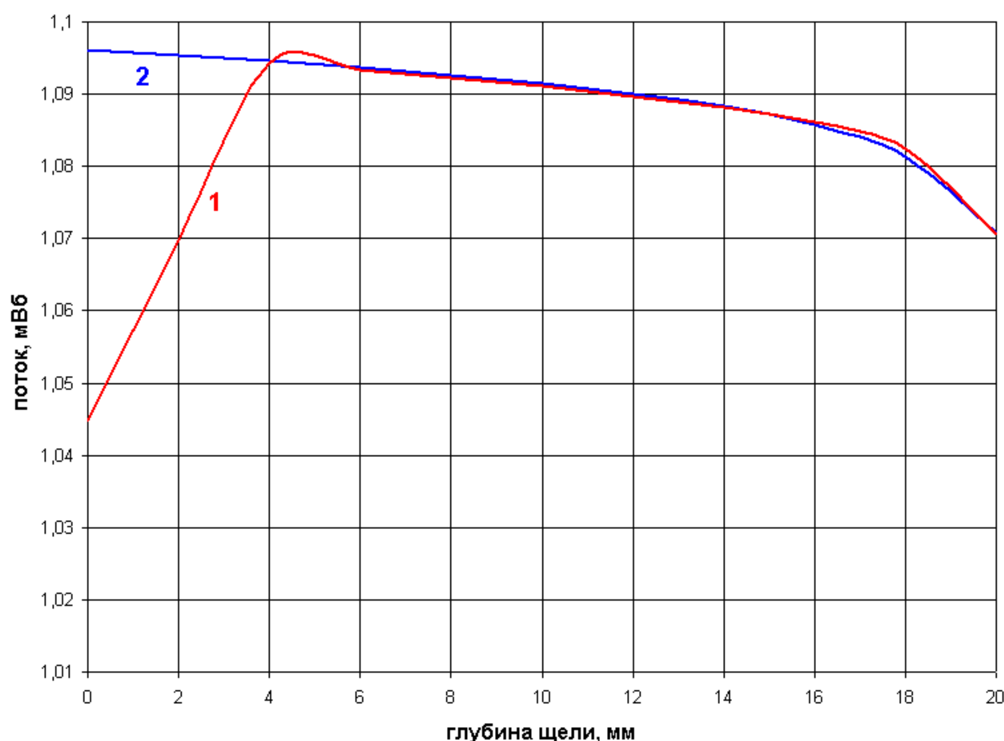


Рис. 2. Зависимость магнитного потока через торец магнита от глубины щели шириной 1 миллиметр.
По горизонтали - глубина щели в миллиметрах, по вертикали - магнитный поток в микровеберах. Кривая 1 получена расчётом по обычной методике, а кривая 2 с «замораживанием» сетки конечных элементов.

Проанализируем наши действия. В соответствии с инструкцией, прилагаемой к программе, мы задали физические свойства входящих в магнитную цепь блоков (магнитов, плиты, воздуха), задали геометрическую картину (пока без щели) и поручили программе автоматически задать ячейки сетки точек на плоскости, в которых осуществляется стыковка вычисляемых параметров поля. После этого программа вычислила магнитный поток. Когда мы ввели изображение щели, сетка привязки исчезла, так как изменилась геометрия стальной плиты и воздуха над ней. Для расчета при изменившейся геометрии нам пришлось поручать программе строить сетку привязки заново (за исключением сетки внутри магнитов и воздушного пространства под плитой). То же самое происходило всякий раз при изменении глубины щели (см. рис. 3). Таким образом, при вычислении параметров поля для каждого значения глубины щели программа осуществляла новое построение сетки привязки, и такое перестроение приводило к значительным ошибкам в вычислениях.

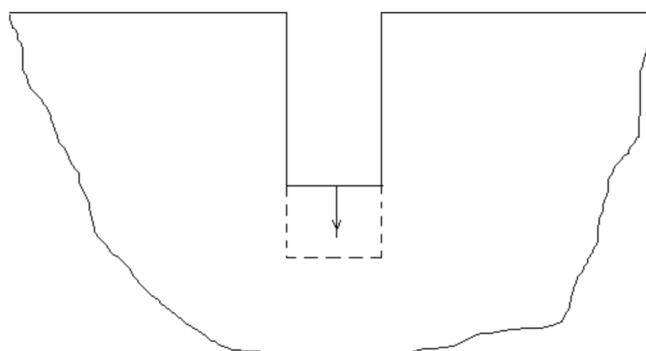


Рис. 3. Схема изменения геометрии щели при расчёте по обычной методике. Стрелкой показано перемещение нижней границы щели при увеличении её глубины.

Следовательно, для получения приемлемой точности, необходимо “заморозить” сетку привязки на весь цикл вычислений во всём диапазоне значений варьируемого геометрического параметра (в нашем случае - глубины щели).

Осуществить это, в данном случае, можно следующим образом:

Посредине плиты рисуется сплошной вертикальный разрез шириной 1 мм и разбивается на квадраты размером 1 х 1 мм (см. рис. 4). Разрезанная таким образом плита (обе половинки) сохраняет физические свойства стали (как и до введения разреза). Такие же свойства придаются и всем двадцати (в нашем случае) квадратикам, заполняющим разрез.

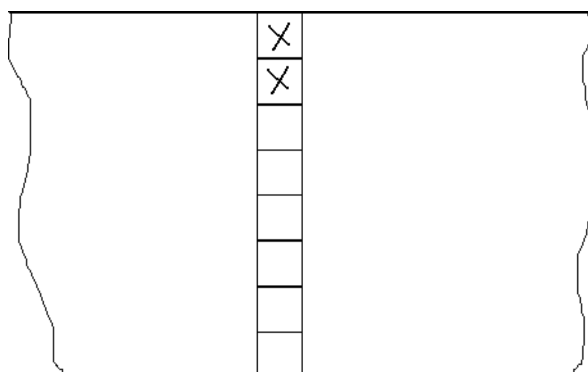


Рис. 4. Схема дискретного изменения геометрии щели при расчёте по предлагаемой в статье методике «замораживания» сетки. Крестиками отмечены квадратики, физические обозначения которых изменены со «стали» на «воздух».

Если теперь поручить программе построить сетку привязки и затем последовательно менять физические параметры этих квадратиков со “стали” на “воздух”, то можно дискретно менять глубину щели от нулевой до максимальной (20 мм), не меняя геометрии рисунка и сохраняя сетку привязки неизменной.

На рисунке 2 кривая 2 иллюстрирует результаты расчёта по описанной методике. Ход полученной кривой вполне соответствует ожидаемому из физических соображений. Сравнение кривых 1 и 2 рисунка 2 показывает, что расчёт по неудачной методике даёт погрешность, существенно превосходящую диапазон изменения потока при максимальной вариации глубины щели (в нашем случае).

Для иллюстрации стабильности результатов, достигаемой применением предложенной методики, приведем рисунок 5. На нём изображена зависимость относительного изменения потока через торец магнита при появлении в плите щели шириной 1 и глубиной 19 мм от магнитной проницаемости плиты.



Рис. 5. Зависимость относительного изменения магнитного потока через торец магнита при появлении в стальной плите щели шириной 1 и глубиной 19 миллиметров от магнитной проницаемости материала плиты. По горизонтали - относительная проницаемость материала плиты. По вертикали - относительное изменение потока в процентах.

Из рисунка видно, что данная конфигурация магнитной цепи является оптимальной для выявления щелей в плите из материала с магнитной проницаемостью порядка двадцати. Интересно, что повышение проницаемости плиты, сверх некоторого значения, вызывает падение чувствительности системы к появлению дефекта. Вероятнее всего, магнитное сопротивление плиты становится настолько малым, что его изменение от появления щели никак не отражается на суммарном сопротивлении магнитной цепи.

Задача вихревых токов

Поскольку в программе ELCUT 4.1 решаются только плоские и осесимметричные задачи, мы не можем рассматривать обтекание трещины вихревым током. По этой причине ограничимся рассмотрением взаимодействия кругового витка с током и металлического диска (осесимметричная задача). Виток (см. рис. 6) изготовлен из медного провода квадратного сечения (1 x 1 мм), его диаметр составляет 80 миллиметров. Он размещён над центром диска диаметром 240 мм на высоте 6 мм от него. Виток изготовлен из меди с удельной проводимостью $5{,}6\cdot10^{7}$ сим / м и по нему пропускается синусоидальный переменный ток заданной частоты. Диск изготовлен из стали с удельной проводимостью 10^{7} сим / м и магнитной проницаемостью 100, не зависящей от напряжённости поля (в программе ELCUT 4.1 рассматриваются только линейные задачи вихревых токов).

При решении задачи вихревых токов также используем нашу методику “замораживания” сетки привязки, для чего составляем диск (в геометрическом смысле) из нескольких, лежащих друг на друге. Толщина верхнего диска (ближайшего к витку) равна 0,1 мм, затем следуют диски толщиной 0,3 мм, 0,3 мм, 0,8 мм, 1,6 мм, 3,2 мм, 6,4 мм и 12,8 мм. Последовательно придавая перечисленным дискам свойства стали или воздуха, мы можем задавать значения толщины стального диска 0 мм, 0,1 мм, 0,3 мм, 0,7 мм, 1,5 мм, 3,1 мм, 6,3 мм, 12,7 мм и 25,5 мм, не меняя сетки привязки.

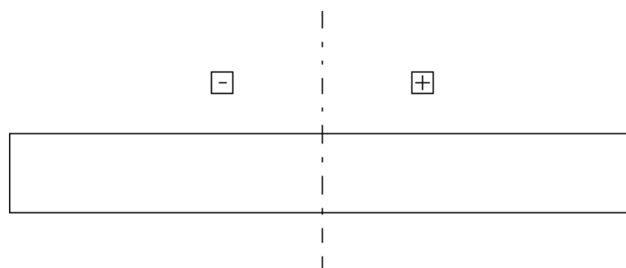


Рис. 6. Круговой виток над металлическим диском при расчёте задачи вихревых токов. Диаметр витка 80 мм. Диаметр диска 240 мм. Расстояние между витком и диском 6 мм. Магнитная проницаемость материала диска 100.

На рис. 7 приведены зависимости приращений модуля потока через виток от толщины стального диска на частотах 10, 640 и 2560 герц (кривые 1, 2 и 3 соответственно).

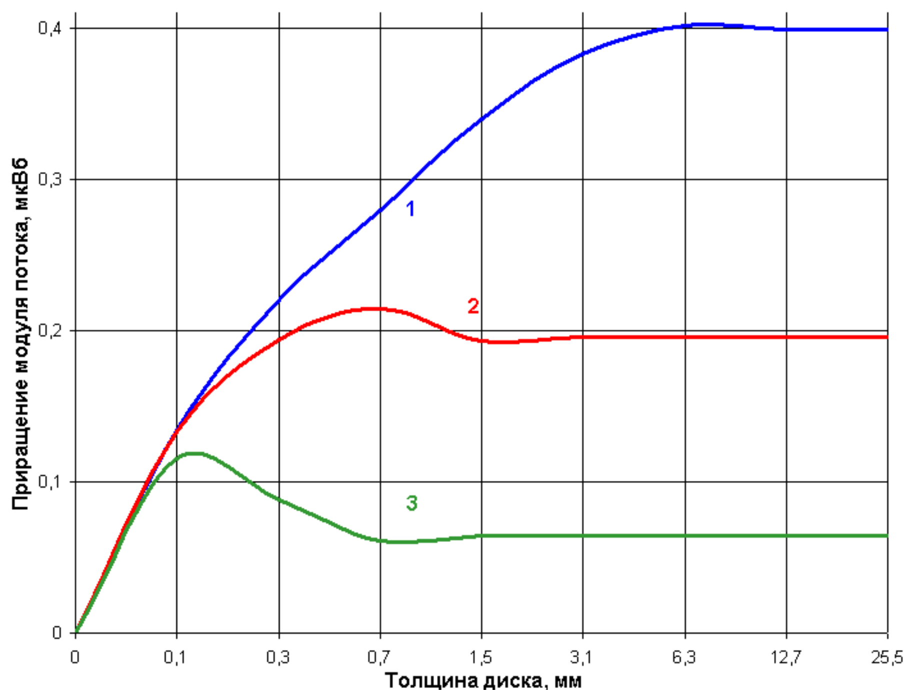


Рис. 7. Зависимость модуля магнитного потока через плоскость кругового витка от толщины лежащего под ним стального диска при различных значениях частоты тока через виток. По горизонтали - толщина диска в миллиметрах. По вертикали – приращение модуля магнитного потока через плоскость витка в микровеберах. Кривая 1 – соответствует частоте 10 герц, а кривые 2 и 3 частотам 640 и 2560 герц соответственно.

Поток через виток растёт с увеличением толщины диска, пока эта толщина не достигает глубины проникновения магнитного потока в металл на данной частоте. После этого поток перестаёт расти с толщиной и может даже уменьшиться. На рис. 8 приведены аналогичные зависимости для фазы потока через виток относительно проходящего по нему тока при тех же частотах.

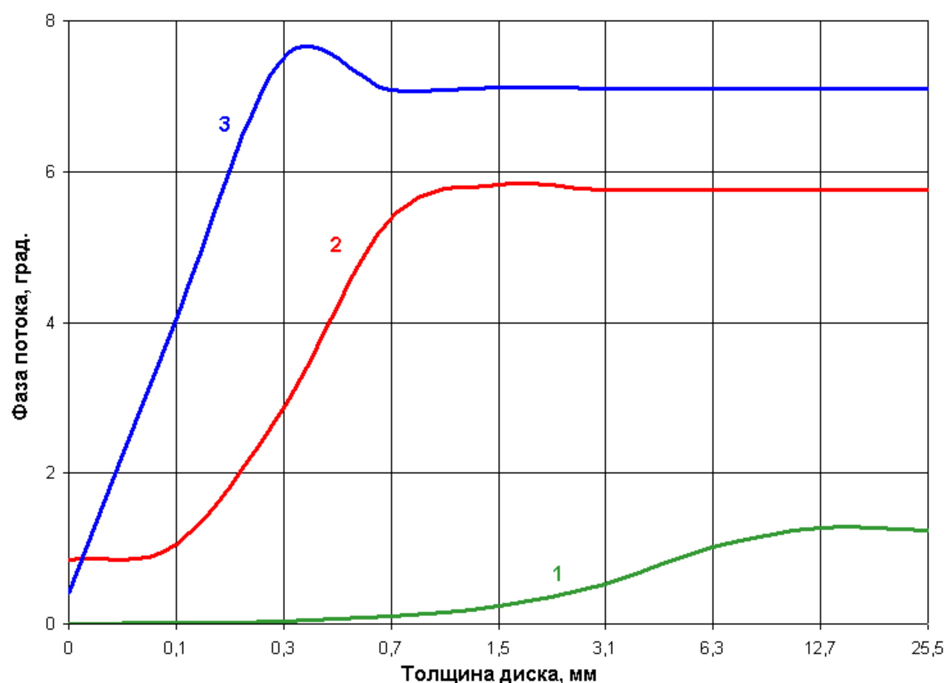


Рис. 8. Зависимость фазового сдвига магнитного потока через виток от толщины лежащего под ним стального диска при различных частотах тока через виток. По горизонтали - толщина диска в миллиметрах. По вертикали - угол сдвига фазы потока относительно тока через виток в угловых градусах. Кривая 1 – частота 10 герц, а кривые 2 и 3 – частоты 640 и 2560 герц соответственно.

Сдвиг фазы магнитного потока нарастает по мере увеличения толщины диска, а затем рост прекращается при превышении толщиной диска глубины проникновения потока в металл.

Сравнение с расчётами по программе ELCUT 4.2

Наряду с бесплатно распространяемой версией программы ELCUT (версия 4.1), существует её более совершенная модификация ELCUT 4.2, распространяемая тем же кооперативом TOP, но уже по довольно солидной цене. Эта версия программы не имеет ограничения на количество узлов координатной сетки и поэтому потенциально обеспечивает гораздо большую точность расчётов. Однако, это утверждение справедливо лишь при продуманном использовании программы (как, впрочем, и любого другого дорогостоящего продукта). На рис. 9 изображены вычисленные по программе ELCUT 4.2 кривые зависимости потока через торец постоянного магнита от глубины щели в стальной плите, полученные при тех же условиях, что и изображённые на рисунке 2.

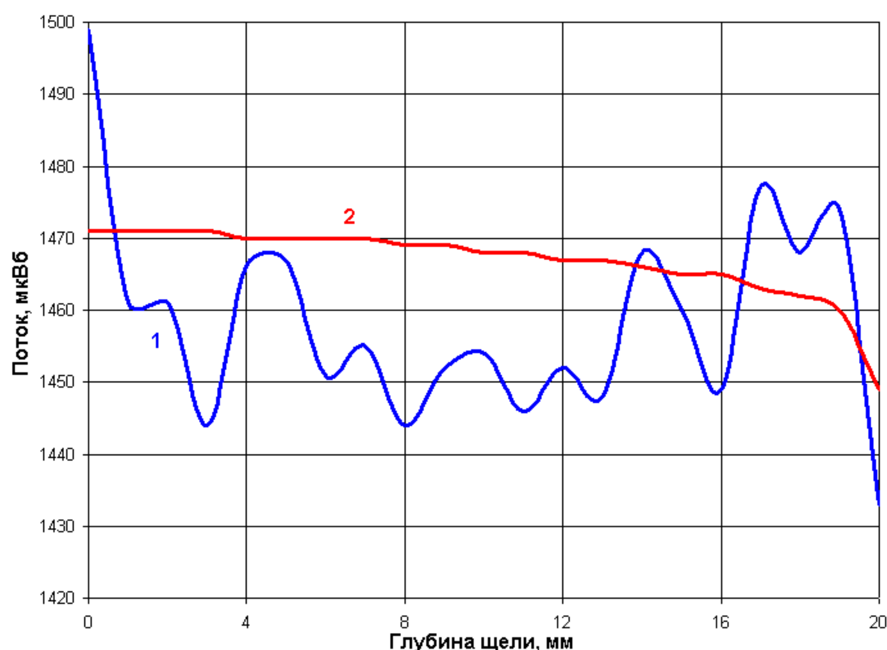


Рис. 9. Зависимость магнитного потока через торец магнита от глубины щели шириной 1 миллиметр, рассчитанная по программе ELCUT 4.2. По горизонтали - глубина щели в миллиметрах, по вертикали - магнитный поток в микровеберах. Кривая 1 получена расчётом по обычной методике, а кривая 2 с «замораживанием» сетки конечных элементов.

Кривая 1 соответствует расчёту без «замораживания» узлов координатной сетки, а кривая 2 расчёту с «замораживанием». Видно, что предлагаемая авторами методика «замораживания» более чем на порядок увеличивает точность расчётов по программе ELCUT 4.2, то есть имеет универсальное применение.

Для сравнения версий, расчёты, выполненные с использованием программы ELCUT 4.1 и проиллюстрированные рисунками 1 – 8, были повторены с использованием программы ELCUT 4.2. Оказалось, что абсолютные значения результатов, полученных по этим версиям, могут различаться в 2 – 3 раза (причём, в любую сторону). В то же время, ход кривых и положения их максимумов совпадают вполне удовлетворительно (чего вполне достаточно для выяснения основных закономерностей).

Следует заметить, что гораздо большая точность расчётов, обеспечиваемая программой ELCUT 4.2, даётся ценой не только значительных материальных затрат, но и больших потерь времени. Например, расчёт поля на частоте 100 килогерц продолжается более получаса на компьютере с тактовой частотой около одного гигагерца. В целом же, обе версии программы очень удобны и легки в освоении.

Заключение

Приведены примеры использования программы ELCUT 4.1 для расчётов типичных задач дефектоскопии. Полученные результаты хорошо отображают физическую картину рассматриваемых явлений.

Предложена методика "замораживания" сетки конечных элементов программы, позволяющая существенно повысить точность и повторяемость расчётов.

Проведено сравнение результатов расчётов характерных задач электромагнитной дефектоскопии, выполненных на версиях 4.1 и 4.2 программы ELCUT. Показано, что версия 4.1 программы, свободно распространяемая через сеть Интернет, позволяет с удовлетворительной точностью выявлять основные закономерности, характерные для задач дефектоскопии.

Было бы большим упущением не использовать такой чрезвычайно удобный, наглядный и информативный инструмент в научных и инженерных исследованиях и разработках, в особенности, учитывая отсутствие затрат на его приобретение. Опыт, накопленный при использовании версии 4.1, позволит с лёгкостью освоить версию 4.2 в случае её приобретения.